



Ордена Ленина
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
имени М.В. Келдыша.
Академии Наук СССР

TM-77216
(509-15)

М.Я. Маров, А.П. Гальцев, В.П. Шари

File Copy

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПРОФИЛЯ H_2O
ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА
В НИЖНЕЙ АТМОСФЕРЕ ВЕНЕРЫ

Препринт № 164 за 1982 г.

Москва.

О р д е н а Л е н и н а
И Н С Т И Т У Т П Р И К Л А Д Н О Й М А Т Е М А Т И К И
и м е н и М . В . К е л ы ш а
А к а д е м и и Н а у к С С С Р

М.Я.Маров, А.П.Гальцев, В.П.Шари

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПРОФИЛЯ H_2O
ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА
В НИЖНЕЙ АТМОСФЕРЕ ВЕНЕРЫ

Москва

УДК 551.81:523.42

Восстановление профиля H_2O по результатам моделирования теплового потока в нижней атмосфере Венеры. М.А.Маров, А.П.Гальцев, В.П.Шари. Препринт Ин.прикл.матем. им. М.В. Келдыша АН СССР, 1982, № 164, 15с., библиогр.: 17 назв.

По данным эффективного потока излучения восстановлен профиль H_2O в нижней атмосфере Венеры. Показано, что содержание паров H_2O сосредоточено в основном в слое 20-48 км и зависит от времени и места измерений. Абсолютные значения H_2O , определенные оптическим методом, значительно меньше значений, полученных методами забора проб, особенно ниже 20 км.

Ключевые слова: атмосфера Венеры, перенос излучения, профиль H_2O .

The H_2O profile in the Venus lower atmosphere is reconstructed by the effective radiation flux data. It is shown that the H_2O vapor abundance is concentrated mainly in the 20 to 48 km layer and depends on measurement time and location. The magnitudes of H_2O optically determined are much less than those obtained by probing, especially below 20 km.

Key words: Venus atmosphere, radiative heat transfer, H_2O profile.

Введение

Проблема газовых компонент атмосферы Венеры является одной из наиболее актуальных с точки зрения понимания процесса образования и эволюции атмосфер планет земной группы и определения их оптических свойств. За последнее время в этом направлении достигнут замечательный прогресс благодаря измерениям, выполненным как методами прямого забора проб (масс-спектрометрическим и газовой хроматографии), так и косвенным, оптическим. Вместе с тем, в оценках содержания относительно малых компонент атмосферы сохраняются определенные расхождения, влияющие, в частности, на корректность изучения количественных характеристик механизма теплообмена. Это касается в первую очередь водяного пара, содержание которого по данным газовой хроматографии [1] и оптической спектроскопии [3,4] различаются более чем на порядок. В данной работе с использованием результатов измерений эффективного потока на аппаратах "Пионер-Венера" [2,6], были восстановлены вертикальные распределения H_2O для двух областей зондирования: северный зонд ($59,3^\circ$; $4,8^\circ$) и ночной зонд ($28,7^\circ$; $56,7^\circ$), относящиеся соответственно к марту и февралю по условному земному времени года. Измерения в северной области проведены также в ночных условиях, поэтому они отличаются в основном по широте.

Сравнительный анализ полученных профилей эффективного потока при фактически одинаковой температуре и концентрации CO_2 показывает, что их различие может быть в первую очередь обусловлено вариациями малых газовых примесей. Среди них наибольшую роль, очевидно, должен играть водяной пар из-за его сильного влияния на эффективный поток, как это было показано ранее в работах [7-9]. В работах предпринимались попытки восстановить вертикальный профиль H_2O по данным оптических измерений. В работе [4] использовались измерения, полученные с помощью спектрофотометра на АМС "Венера-12", а в работах [2,5] — данные по эффективному потоку, полученные на аппаратах АМС "Пионер-Венера". Однако помимо самих данных измерений на полученные результаты существенным образом влияют также метод решения задачи и используемые оптические свойства основной газовой составляющей атмосферы Венеры CO_2 и примеси H_2O . Они в существенной мере определяют корректность

сопоставления с экспериментальными данными.

Метод расчетов

Целью настоящей работы является попытка восстановления профиля содержания водяного пара в атмосфере Венеры, опираясь на известные результаты по спектрам непрозрачностей CO_2 и H_2O и данные измерения радиационных потоков в атмосфере Венеры. В отличие от работы [2] нами использован другой, на наш взгляд более строгий подход. Известно, что в классе некорректных обратных задач метод восстановления профиля газовой компоненты по эффективному потоку значительно сложнее метода, когда измеряется уходящее излучение в заданной полосе поглощения. Поэтому нами применен метод, который фактически является разновидностью итерационного процесса. Сущность его заключается в следующем.

На рис. I представлены измеренные эффективные потоки и рассчитанные нами по методу, описанному в работе [10]. Распределения давления и температуры с высотой для обоих случаев принимались одинаковыми в соответствии с результатами работ [11, 12]. Расчет проводился для четырех концентраций водяного пара, которые считались постоянными во всей области рассматриваемых высот от 0 до 48 км. Как видно из рис. I, измеренные значения потока во всей области высот, начиная с 13 км (нижняя точка измерения) располагаются в пределах расчетов, полученных для чисто углекислой атмосферы внизу и для атмосферы с максимальной концентрацией водяного пара $q_{\text{H}_2\text{O}} = 10^{-3} + 10^{-4}$ в области высот около 40 км. Исключение составляют результаты измерений, полученные ночью ниже 30 км. Измеренный эффективный поток превышает рассчитанный для чисто углекислой атмосферы. Можно было бы предположить, что в наших расчетах оптическая плотность CO_2 завышена. Однако авторы измерений [2] признали, что результаты, полученные ими в ночных условиях ниже примерно 30 км ошибочны. Таким образом, из рис. I можно сделать качественный вывод о том, что концентрация H_2O меняется с высотой в пределах от 0 до 10^{-3} и различна для измерений эффективного потока, проведенных "ночью" и на "севере". (В дальнейшем будем употреблять эту терминологию, помня, что она соответствует условиям измерений, указанным в начале работы).

Для восстановления детального профиля H_2O поступим следующим образом. Известно, что в плотных средах эффективный поток может быть приближенно рассчитан по формуле:

$$P = \frac{16}{3} \frac{\sigma}{K_R} T^3 \frac{dT}{dz} \quad (1)$$

где: K_R — коэффициент Росселанда;
 σ — постоянная Стефана-Больцмана;
 T — температура в градусах Кельвина.

Поэтому нами были рассчитаны коэффициенты Росселанда в см⁻¹ для условий атмосферы Венеры для четырех значений концентрации водяного пара: 10^{-3} ; 10^{-4} ; 10^{-5} и 0. На рис.2 представлены результаты расчетов эффективного потока, полученные прямым методом [10] и с помощью формулы (1). Видно, что использование формулы (1) приводит к завышению значения потока, особенно для чисто углекислой атмосферы Венеры и на больших высотах. Следовательно, атмосферу Венеры нельзя считать настолько оптически плотной, особенно на больших высотах, чтобы приближение Росселанда "работало" хорошо и влиянием верхней границы можно было пренебречь. По существу это связано с тем, что перенос излучения в нижней атмосфере Венеры осуществляется в нескольких окнах прозрачности [8,9]. Увеличение H_2O приводит к увеличению поглощения в этих окнах, к росту оптической толщины атмосферы и, как следствие, к улучшению результатов расчетов в приближении Росселанда.

Значения потоков, полученные по формуле (1), неплохо согласуются с точными расчетами вплоть до 38-40 км; поэтому концентрация H_2O в первом приближении находилась с помощью коэффициента Росселанда. Для этого по измеренным значениям эффективного потока из формулы (1) находился коэффициент Росселанда как функция высоты. Так как он зависит от концентрации H_2O , то она подбиралась таким образом, чтобы рассчитанные и определенные по формуле (1) значения коэффициента Росселанда совпали между собой. Выше 40 км принималась $q_{H_2O} = 10^{-4}$ и 10^{-5} соответственно для "ночного" и "северного" профиля. По найденным таким образом значениям содержания водяного пара выполнены расчеты эффективного потока. Полученные результаты оказались существенно ближе к измеренным профилям, чем изображенные на рис.1. Однако расхождение между ними еще значительно. Поэтому для уточнения высотного распределения

H_2O примем во внимание следующее обстоятельство. Так как перенос происходит в нескольких окнах прозрачности, где изменение коэффициента CO_2 с длиной волны имеет довольно плавный характер и основную роль играют полосы H_2O , то удобно воспользоваться видоизмененным решением для потока излучения, полученным в работе [13] для случая газа с налегающими полосами поглощения. Это решение можно записать в виде:

$$\Phi = \sum_{i=1}^N \Delta\lambda_i [B_i(T_1) - B_i(T_2)] \cdot [-\ln \tau_i(x) - c + \ln 4] \quad (2)$$

где:

- N - число полос поглощения;
- T_1, T_2 - температуры поверхности планеты и нижнего слоя облаков;
- τ_i - оптическая толщина i -ой полосы паров H_2O ;
- c - постоянная;
- B_i - поток излучения черного тела в центре i -ой полосы шириной $\Delta\lambda_i$.

Из формулы (2) следует, что на каждой высоте существует логарифмическая зависимость между эффективным потоком и концентрацией (через τ_i) водяного пара. Поэтому для зависимости потока излучения от концентрации H_2O использовалась формула регрессии в виде:

$$\Phi = a + b \cdot \ln q_{H_2O} \quad (3)$$

С использованием рассчитанных нами значений потока для разных содержаний q_{H_2O} на каждой высоте методом наименьших квадратов были определены параметры, входящие в формулу (3). Хотя эти параметры изменялись с высотой, тем не менее коэффициент корреляции всюду был близок к единице (не менее 0,95). После этого, подставив в формулу (3) измеренные значения потока, легко найти высотные распределения H_2O . Значения потока, полученные "ночью" брались от 48 км вплоть до 20 км. Определенные концентрации H_2O вновь были использованы для прямых расчетов эффективного потока. Полученные значения совместно с экспериментальными данными приведены на рис.3. Из него видно, что имеет место практи-

чески полное совпадение результатов во всей области высот. Расхождение не превышает $2+3 \text{ вт/м}^2$, что соответствует ошибке измерений эффективного потока.

Обсуждение результатов

На рис. 4 представлены найденные изложенным выше способом вертикальные распределения H_2O . Ниже 28 км ночной профиль H_2O имеет приближенный характер, что обусловлено погрешностью измеренных значений эффективного потока [2]. Приведены также результаты, полученные оптическим методом [3,4] и методом газовой хроматографии [1]. Обращает на себя внимание значительное различие результатов, полученных этими двумя методами, особенно в нижних слоях атмосферы (на высоте 24 км), где расхождение достигает нескольких порядков величины. В то же время и данные, полученные оптическим методом, различаются между собой. Это расхождение можно объяснить видимому тем обстоятельством, что использовались различные оптические характеристики CO_2 и H_2O .

Как видим, результаты наших расчетов приводят к выводу, что вплоть до 20 км непрозрачность атмосферы Венеры обусловлена только углекислым газом. Вклад водяного пара становится заметным выше и достигает максимума в районе 40 км. В то же время по данным других авторов [3,4] следует включать H_2O , хотя и в малых концентрациях, в расчеты оптических свойств нижних слоев атмосферы Венеры. Трудности расчета спектра поглощения CO_2 для условий, имеющих место в нижних слоях, общеизвестны. Поэтому расхождение данных ниже 20 км не вызывает особого удивления. Скорее удивительно то, что оптические характеристики CO_2 , используемые в расчетах [2], и основанные, вероятно, на данных работы [14], таковы, что на высотах больше 40 км рассчитанные значения эффективного потока превышают измеренные на 20 вт/м^2 и на 40 вт/м^2 для "северного" и "ночного" профиля соответственно даже при использовании максимально известного в настоящее время значения содержания H_2O , измеренного методом газовой хроматографии ($\chi_{\text{H}_2\text{O}} = 5 \cdot 10^{-3}$). На этих высотах давление и температура почти близки к нормальным и поэтому определение, теоретическое или экспериментальное, оптических свойств CO_2 уже не сопряжено со столь значительными трудностями, как вблизи поверхности планеты. Нам кажется, что авторы работы

[14] занижают значения непрозрачности CO_2 , что приводит к завышению концентрации H_2O , необходимой для согласования рассчитанных и измеренных значений эффективного потока. Нельзя вместе с тем исключить и того, что в тепловой баланс на этих высотах существенный вклад вносят облака с нижней границей на высоте 47–49 км и подоблачная дымка в области высот 47–32 км [15, 16], переотражающие часть уходящей тепловой радиации и соответственно уменьшающие величину эффективного потока.

Из представленного здесь анализа тепловых потоков в углекислой атмосфере с примесью H_2O следует, что водяной пар сосредоточен в виде слоя толщиной порядка 30 км с максимумом концентрации вблизи 40 км. При этом максимальное значение концентрации H_2O для ночного профиля превышает соответствующее значение для оверного профиля в 25 раз. Этот эффект не может быть объяснен ошибками измерений и их интерпретации. Действительно, в расчетах в обоих случаях брались одинаковые профили температуры и давления. Используя уравнение (1), оценим ошибку, которая может возникнуть при определении концентрации водяного пара. Из (1) следует:

$$\frac{\Delta \Phi}{\Phi} = \frac{\Delta K_R}{K_R} + 3 \frac{\Delta T}{T} + \frac{\Delta \gamma}{\gamma} \quad (4)$$

где: γ – градиент температуры.

По данным работы [11] различие в значениях температуры не превышает 10°K (температурные профили, приведенные на рисунке, практически совпадают между собой). Изменением коэффициента Росселанда можно пренебречь и вместо (4) написать:

$$\frac{\Delta \Phi}{\Phi} = 3 \frac{\Delta T}{T} + \frac{\Delta \gamma}{\gamma} \quad (5)$$

Пренебрегая различием в градиенте температуры и учитывая, что на высоте 40 км $T=374^\circ\text{K}$, получаем $\Delta \Phi / \Phi = 10\%$. Поэтому $\Delta \Phi \ll 8 \text{ вт/м}^2$, что не может привести к полученному в расчетах фактическому различию тепловых потоков. Оно вероятно обусловлено сильной пространственной и временной изменчивостью содержания H_2O в атмосфере Венеры, особенно вблизи основания облаков.

С наличием такой вариации можно попытаться связать также расхождение в результатах измерений, осуществленных на высотах около 40 км оптическим методом и методом забора проб в разное время и в разных районах планеты. Однако на меньших высотах, ниже слоя максимума концентрации, наблюдаемое рассогласование скорее носит инструментальный характер. По нашему мнению, в нижних слоях атмосферы методы забора проб, к которым относится масспектрометрический и газовой хроматографии дают завышенные результаты, что можно было бы объяснить следующим образом: влага вначале адсорбируется на поверхности инструментов и самого зонда, а в дальнейшем, в процессе повышения температуры в нижних слоях атмосферы, происходит ее десорбция, сильно влияющая на результаты прямых измерений. Что же касается спектрофотометрических измерений, то они могут различаться между собой даже при одних и тех же значениях эффективного потока, что обусловлено достоверностью используемых оптических характеристик CO_2 и H_2O . Тем не менее, даже с учетом допустимых вариаций непрозрачности, устранить принципиальное расхождение с прямыми измерениями в нижней атмосфере Венеры не удастся.

Таким образом, вывод о том, что полученное нами в расчетах уменьшение относительного содержания паров H_2O с высотой и указание на то, что оно подвержено сильным пространственным и временным вариациям, подтверждается данными прямых измерений на космических аппаратах, несмотря на остающиеся различия оценок, даваемых разными методами. С другой стороны наличие адиабатического градиента температуры свидетельствует в пользу представлений о наличии полного перемешивания в нижних слоях атмосферы Венеры. Поэтому возникнет проблема "стока" H_2O в нижних слоях или, наоборот, "высвобождения" влаги с ростом высоты, что позволило бы разрешить указанное противоречие.

На первую возможность подобного процесса недавно указал Р.Принн [17], рассмотревший механизм эвакуации водяного пара из нижней атмосферы за счет реакций разложения молекулы H_2O при высоких температурах с участием серосодержащих соединений. Если обоснованность этого механизма в дальнейшем будет подтверждена, это послужит дополнительным обоснованием изложенных здесь результатов расчета.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. V.I.Oyama et.al.. Science, 203, No.4382, 802, 1979.
2. V.E.Suomi et.al.. J.Geophys. Res., 85, No.A13, 8200, 1980.
3. Е.А.Устинов, В.И.Мороз. Космич. исслед., 16, № I, 127, 1978.
4. В.И.Мороз, Н.А.Парфентьев, Н.Ф.Санько.
Космич. исслед., 17, № 5, 727, 1979.
5. В.П.Шари. Препринт Ин. прикл. матем. им.М.В.Келдыша АН СССР
1982, № 31.
6. V.E.Suomi et.al.. Science, 205, 82, 1979.
7. М.Я.Маров, В.П.Шари. Препринт Ин. прикл. матем. им.М.В.Келдыша АН СССР, 1973, № 23.
8. В.П.Шари. Препринт Ин. прикл. матем. им.М.В.Келдыша АН СССР,
1974, № II.
9. А.П.Гальцев, В.М.Осипов, В.П.Шари. Космич. исслед.,
14, № 3, 417, 1976.
10. Т.Г.Адикс, А.П.Гальцев, В.М.Осипов, В.П.Шари. Препринт
Ин. прикл. матем. им.М.В.Келдыша АН СССР, 1981, № 15.
11. A.Seiff et.al.. Science, 205, 46, 1979.
12. М.Я.Маров. Fundamentals of cosmic physics, 1979, v.5, p.1.
13. Д.Нельсон. Теплопередача, № 4, III, 1976.
14. R.W.Voese et.al.. Science, 203, No.4382, 797, 1979.
15. М.Я.Маров, Б.В.Бывшев, К.Н.Мануйлов и др.. Космич. исслед.,
14, № 5, 729, 1976.
16. М.Я.Маров et.al.. Icarus, 44, 608, 1980.
17. Р.Принн. Доклад на XVIII Генеральной ассамблее МАС, Патрас,
1982 г.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1. Измеренные (точки - "север", крестики - "ночь") и рассчитанные значения эффективного потока.
 $q_{H_2O} = 10^{-3}$ (1); 10^{-4} (2); 10^{-5} (3); 0 (4).
- Рис. 2. Рассчитанные значения эффективного потока: сплошные линии - точный расчет, пунктирные - по формуле (1). Обозначения на рис. 1.
- Рис. 3. Рассчитанные и измеренные значения эффективного потока.
- Рис. 4. Вертикальное распределение водяного пара в нижней атмосфере Венеры: 1 и 2 - данные авторов; 3 и 4 - данные работы [2] по измеренным эффективным потокам на "севере" и "ночью" соответственно; 5 - данные работы [4]; 6 - работы [1].

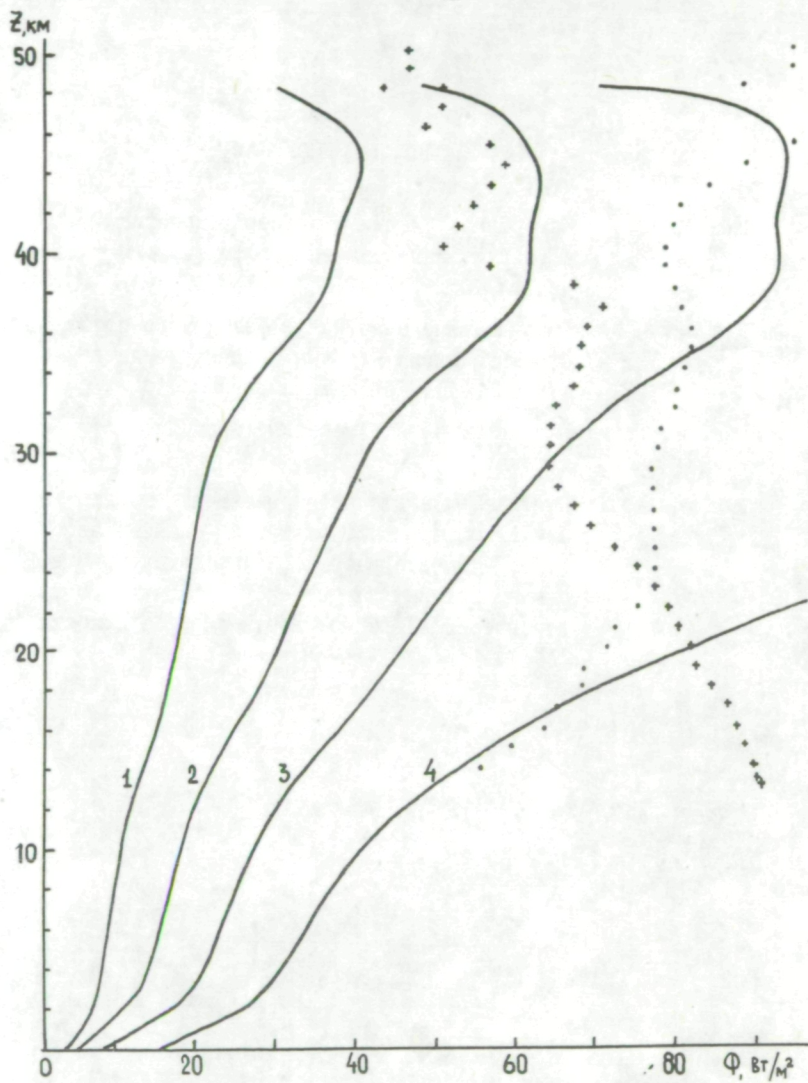


Рис. 1

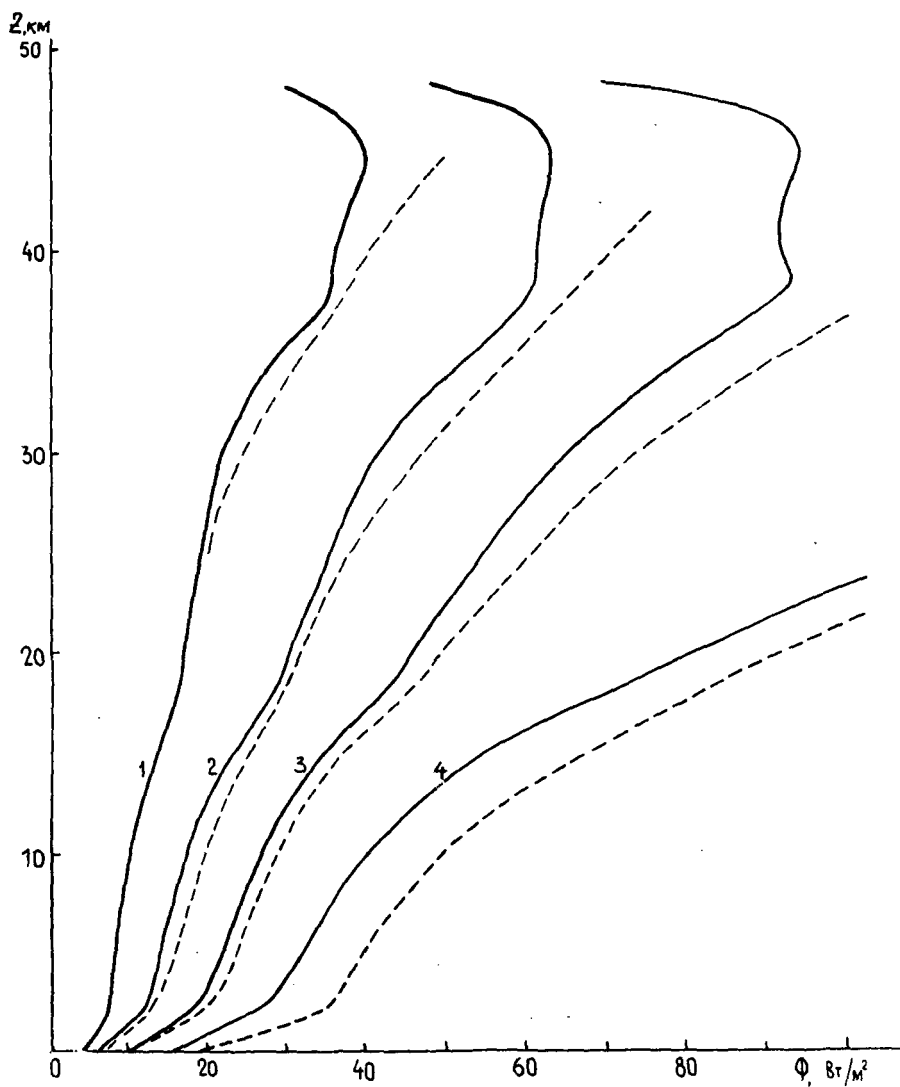


Рис. 2

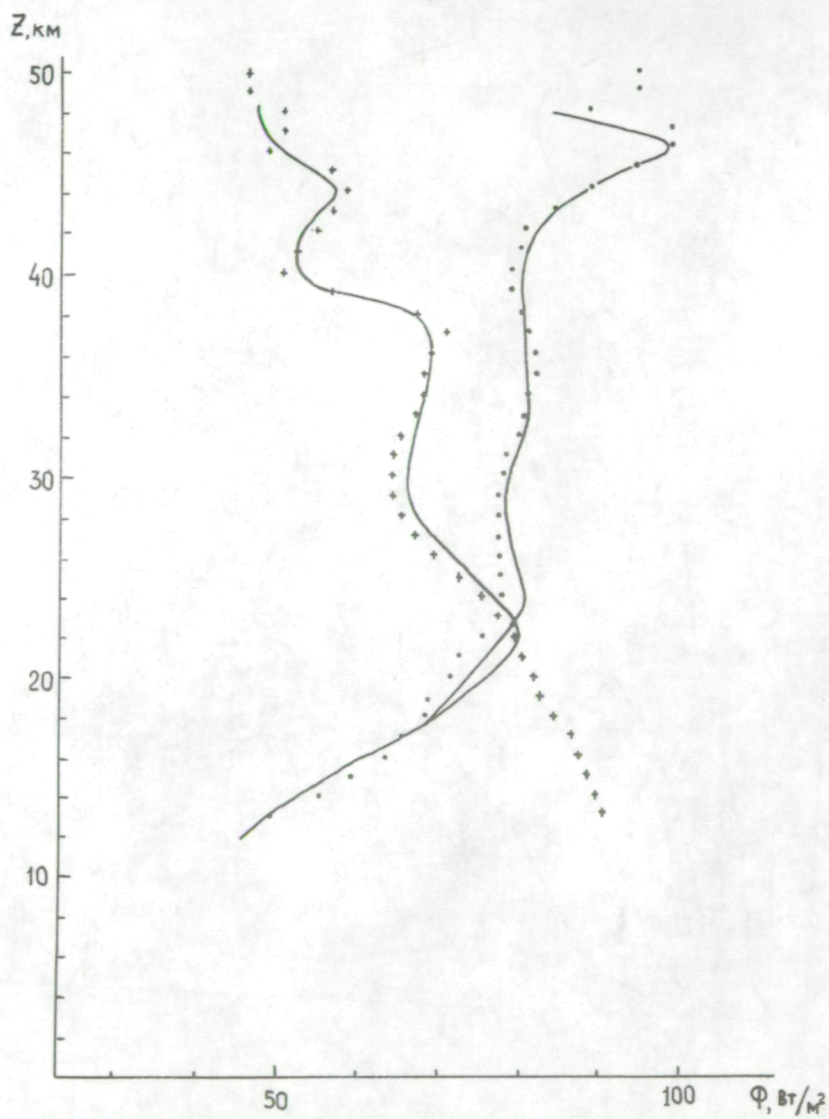


Рис.3

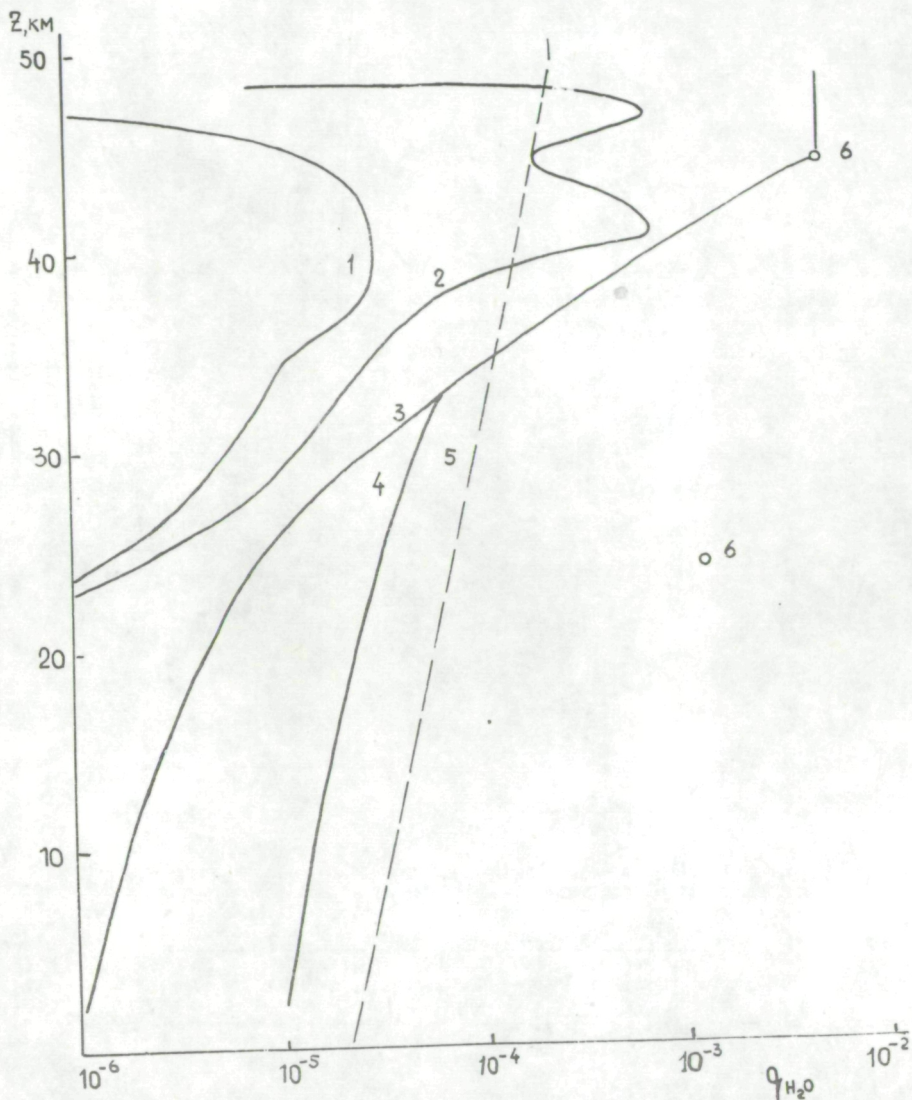


Рис. 4

М.Я. Маров, А.П. Галыцев, В.П. Шари " Восстановление профиля H_2O по результатам моделирования теплового потока в нижней атмосфере Венеры. "

Редактор Ю.И. Ефимов.

Корректор Н.Л. Лукашевич.

Подписано к печати 27.10.82 г. № Т-19903. Заказ № 761.

Формат бумаги 60X90 1/16. Тираж 180 экз.

Объем 0,7 уч.изд.л. Цена 5 коп.

035 (02)2

С

Отпечатано на роталпринтах в Институте прикладной математики АН СССР
Москва, Миусская пл. 4.

Все авторские права на настоящее издание принадлежат Институту прикладной математики им. М.В. Келдыша АН СССР.

Ссылки на издание рекомендуется делать по следующей форме:
и.о., фамилия, название, препринт Ин. прикл. матем. им. М.В. Келдыша
АН СССР, год, №.

Распространение: препринты института продаются в магазинах Академкниги г. Москвы, а также распространяются через Библиотеку АН СССР в порядке обмена.

Адрес: СССР, 125047, Москва-47, Миусская пл. 4, Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша АН СССР, ОНТИ.

Publication and distribution rights for this preprint are reserved by the Keldysh Institute of Applied Mathematics, the USSR Academy of Sciences.

The references should be typed by the following form: initials, name, title, preprint, Inst.Appl.Mathem., the USSR Academy of Sciences, year, N(number).

Distribution. The preprints of the Keldysh Institute of Applied Mathematics, the USSR Academy of Sciences are sold in the bookstores "Academkniga", Moscow and are distributed by the USSR Academy of Sciences Library as an exchange.

Adress: USSR, 125047, Moscow A-47, Miusskaya Sq.4, the Keldysh Institute of Applied Mathematics, Ac.of Sc., the USSR, Information Bureau.

Цена 5 коп.